Énergie, Mines et Ressources Canada
Energy, Mines and Resources Canada

N° 86-4F

RAPPORT DE CANMET

ANALYSE D'IMAGE:

APERÇU DES RÉALISATIONS

W. PETRUK

CANMET
Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

Canada Centre for Mineral and Energy Technology

Canada

87-06428/

ANALYSE D'IMAGE:
APERÇU DES RÉALISATIONS

W. PETRUK

LABORATOIRES DES SCIENCES MINÉRALES
RAPPORT DU CANMET 86-4F

Avril 1986

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M38-13/86-4F
ISBN 0-660-91822-6

au Canada: $2.75
à l'étranger: $3.30

Prix sujet à changement sans préavis

ANALYSE D'IMAGE: APERÇU DES RÉALISATIONS

par

W. Petruk*

RÉSUMÉ

L'analyse d'image consiste à numériser et à analyser une image dans le but de caractériser les différentes structures contenues dans l'image. Quelques chercheurs utilisent l'analyse d'image pour résoudre des problèmes spécifiques en écrivant leurs propres infoprogrammes, mais la généralisation de cette technique requiert des analyseurs commerciaux d'image. Des fabricants ont construit des analyseurs d'image dont les prix et les capacités sont très variables. Tous les analyseurs d'image doivent réaliser quatre fonctions: entrée de l'image, numérisation de l'image, traitement de l'image et sortie des données. Le dispositif d'entrée de l'image peut être: (1) une table à numériser sur laquelle une image est tracée à l'aide d'une plume spéciale, (2) une caméra qui recueille l'image d'un microscope optique ou d'un épidiascope, (3) une interface permettant de recueillir l'image fournie par un microscope électronique à balayage et (4) une image fournie par une mémoire d'ordinateur. Le traitement de l'image varie du simple traitement, tel que la détermination du pourcentage de la superficie d'une phase particulière, à la mesure d'un grand nombre de paramètres pour chaque structure spécifique et à la détermination des facteurs de réflexion et de transmission des structures observées avec un microscope optique. De plus, le faisceau d'électrons d'un microscope électronique à balayage peut être dirigé de façon à balayer chaque élément et à le caractériser en fonction de sa composition. Les analyseurs d'image varient donc du dispositif le plus simple, qui utilise une table à numériser et qui ne peut effectuer que quelques mesures tels le pourcentage superficiel et l'analyse de dimensions des structures, au système complet capable de définir automatiquement toutes les phases dans l'image et de caractériser chaque structure spécifique à l'aide d'une grande variété de paramètres.

---

*Chercheur, Laboratoires des sciences minérales, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa, K1A 0G1.

IMAGE ANALYSIS:
AN OVERVIEW OF DEVELOPMENTS

W. Petruk*

ABSTRACT

Performing image analysis involves digitizing and analyzing an image to characterize the features in it. A few researchers use image analysis to solve specific problems by writing their own computer programs, but widespread usage requires the availability of commercial image analyzers. Manufacturers have built a wide variety of image analyzers whose price and capabilities vary by a large factor. All image analyzers consist of image input, image digitizing, image processing, and data output. The image input can be (i) a digitizer tablet on which an image is drawn with a special stylus; (ii) a TV camera for collecting an image from an optical microscope or an epidiascope; (iii) a SEM interface for collecting a SEM image; and (iv) an image from computer memory. Image processing varies from simple processing such as determining the area % of a specific phase, to measuring a wide variety of parameters for each feature, as well as determining the reflectance and transmittance of features observed with an optical microscope. Furthermore, the electron beam of a SEM can be steered to scan each feature and to identify the feature on the basis of its composition. Image analyzers, therefore, vary from the simplest one which uses a digitizer tablet and can perform only a few measurements such as area % and size analysis of the features, to a fully equipped one that can automatically identify all the phases in the image and characterize each feature by using a wide variety of parameters.

---

*Research Scientist, Mineral Sciences Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, K1A 0G1.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ I
ABSTRACT III
PRINCIPES DE L'ANALYSE D'IMAGE ET RÉALISATIONS 1
CAPACITÉS DES ANALYSEURS D'IMAGE 2
1. Analyseur d'image équipé d'une table à numériser 2
2. Petit analyseur d'image avec image fournie par une caméra de télévision ou par un microscope électronique à balayage 2
3. Analyseur d'image câblé ordinaire 2
4. Analyseur d'image informatisé ordinaire 3
5. Analyseur d'image SEM - TV à une voie 3
6. Analyseur d'image SEM 3
7. Analyseur d'image SEM-EDXA 4
8. Analyseur d'image SEM-EDXA à deux voies 4
9. Analyseur d'image à microsonde 4
10. Infoprogrammes 4
RÉFÉRENCES 5

PRINCIPES DE L'ANALYSE D'IMAGE ET RÉALISATIONS

L'analyse d'image sert dans de nombreuses disciplines à la caractérisation d'objets d'après leurs propriétés physiques. C'est surtout en médecine que cette technique a d'abord trouvé des applications, pour la production de coupes nettes du cerveau et du corps (Gordon, 1976). Les chercheurs ont commencé à utiliser l'analyse d'image lorsque les méthodes de numérisation et d'analyse des images de télévision ont été mises au point. Au début, les chercheurs écrivaient des infoprogrammes pour résoudre des problèmes particuliers. Cependant, pour étendre l'utilisation de la technique, il fallait des analyseurs commerciaux d'image. Le premier analyseur d'utilisation répandue a été mis au point aux environs de 1965, mais ses capacités et sa portée étaient limitées. C'est la mise au point des analyseurs modulaires cablés polyvalents, vers 1969, qui a permis à l'analyse d'image d'envahir la plupart des domaines des sciences physiques (Hbugardy, 1976). Vers 1979, les appareils cablés ont été remplacés par des analyseurs informatisés.

Les analyseurs d'image réalisent quatre fonctions: saisie de l'image, numérisation de l'image, traitement de l'image et sortie des données. Le dispositif ordinaire de saisie de l'image, pour les analyseurs cablés et informatisés, est une caméra de télévision. Cette caméra peut être installée sur n'importe quel microscope optique pour saisir l'image télé d'une section polie ou d'une section fine, ou bien sur un épidiascope pour saisir l'image télé d'une diapositive 35 mm, d'un film 16 mm, d'un négatif, d'une photographie, d'un graphique, d'une carte, etc. L'image est numérisée et affichée sur un écran vidéo. Chaque phase qui possède un niveau de gris différent sur l'image est détectée séparément à l'aide d'un seuil variable. Si l'image détectée comporte un bruit de fond électronique ou si la détection est mauvaise, l'analyseur d'image informatisé peut "nettoyer" l'image de façon que les éléments de l'image détectée soient identiques à ceux de l'image vidéo. L'analyse des objets détectés (traitement de l'image) comporte diverses mesures. Quatre modes de mesure sont possibles: champ, champ-structure, structure et réflexion ou transmission. Dans le mode champ, on mesure les paramètres relatifs à tout le champ: nombre de structure dans le champ, surface totale, pourcentage de la surface couvert par les diverses structures. Dans le mode champ-structure les mesures portent sur le champ entier, mais elles concernent seulement certaines caractéristiques des structures: par exemple, toutes les structures dont la taille est supérieure (ou inférieure) à une dimension donnée, toutes les structures qui sont libres, toutes celles qui ont une certaine orientation, une certaine forme, etc. Les paramètres qui peuvent être déterminés dans ce mode sont le pourcentage de structures d'une certaine dimension, le pourcentage de structures libres, le pourcentage de structures ayant une certaine orientation, etc. Dans le mode structure, les données portent sur chaque structure au lieu de porter sur le champ entier. Ces données sont les diamètres maximal, minimal et moyen, les rapports de forme, les orientations des grains, la superficie, le pourcentage de structures libres, etc. Dans ce mode, presque tous les types d'évaluation qui permettent de caractériser un objet sont possibles. Dans le mode réflexion ou transmission, le niveau de gris de la structure est mesuré et comparé à un étalon.

Les analyseurs d'image cablés et informatisés complètement équipés sont coûteux. Les fabricants ont donc construit des versions simplifiées moins coûteuses, mais de moindres capacités. Ces modèles simplifiés conservent les caractéristiques fondamentales des analyseurs d'image et peuvent donc encore être appelés analyseurs d'image. Par exemple, dans un certain modèle, la saisie de l'image se fait à l'aide de la caméra de télévision, mais seuls les modes champ et champ-structure sont possibles. Un autre modèle est équipé d'une table à numériser qui trace l'image à l'aide d'une plume spéciale. Cet analyseur aussi ne permet que des mesures en mode champ et des mesures limitées en mode champ-structure.

L'image de télévision obtenue avec un microscope optique n'a pas la même précision que celle qu'on obtient avec un microscope électronique à balayage. Ainsi, de nombreuses phases qui ne peuvent être différenciées sur une image de microscope optique le sont facilement sur une image de microscope électronique à balayage. Une interface convenable permettant de saisir l'image fournie par un microscope à balayage a été mise au point vers 1980. L'image recueillie peut être fournie par les électrons secondaires (SE), les électrons rétrodiffusés (BSE), les électrons transmis ou les électrons Auger. De plus, si le microscope électronique à balayage est équipé d'un

analyseur à rayons X en dispersion d'énergie (EDXA), il est possible de recueillir une carte maillée. L'image obtenue est traitée par l'analyseur de la même façon qu'une image de télévision.

La capacité de diriger le faisceau sur un microscope à balayage ou sur une microsonde équipés d'un analyseur en dispersion d'énergie a permis d'identifier séparément chaque particule et d'effectuer une analyse d'image sur les particules identifiées (Jones et Smith, 1978; Hardy et Kokubo, 1981). Le premier modèle, construit vers 1974, consistait en un analyseur d'image distinct connecté à un analyseur en dispersion d'énergie. Cet analyseur d'image permettait seulement des mesures en mode champ ainsi que des mesures limitées en mode champ-structure et en mode structure, mais il était peu coûteux.

Les capacités de l'analyseur d'image distinct connecté à un analyseur en dispersion d'énergie ont été transférées à un programme EDXA (Lee et coll., 1979; Lee et coll., 1981). Certains fabricants d'analyseurs en dispersion d'énergie ont étendu les capacités des programmes EDXA et il est donc possible que les programmes d'analyse d'image EDXA aient bientôt les capacités des analyseurs d'image informatisés ordinaires. Un groupe de chercheurs du CSIRO, en Australie, a déjà mis au point un tel analyseur, le OEM-SEM, qui est maintenant offert dans le commerce.

Les fabricants de l'analyseur d'image informatisé ordinaire ont mis au point une interface qui permet de diriger le faisceau d'électrons d'un microscope à balayage ou d'une microsonde avec l'analyseur d'image. L'analyseur en dispersion d'énergie est utilisé comme un appareil asservi pour l'identification des structures. À l'heure actuelle, l'analyseur d'image SEM-EDXA a probablement plus de capacités que n'importe quel autre analyseur d'image.

M.P. Jones (Jones, 1985), de la Royal School of Mines, a mis au point un analyseur d'image équipé d'une microsonde Cameca. Il effectue l'analyse en déplaçant l'échantillon le long d'une droite, à intervalles réguliers, pour analyser chaque point. Aucune image n'est nécessaire puisque seules les données de comptage des rayons X fournies par les spectromètres sont évaluées en chaque point.

Une dernière étape dans l'analyse d'image consiste à écrire des infoprogrammes pour la résolution de problèmes particuliers.

CAPACITÉS DES ANALYSEURS D'IMAGE

1. Analyseur d'image équipé d'une table à numériser

L'analyseur d'image le plus simple qu'on puisse se procurer est équipé d'une table à numériser qui fait la saisie de l'image. L'image est généralement formée sur une tablette à l'aide d'un microscope spécial et les éléments sont soulignés avec une plume spéciale. Étant donné que cette méthode permet d'introduire seulement des images simples, l'analyse effectuée avec ce dispositif reste élémentaire. Les analyseurs d'image équipés d'une table à numériser permettent de compter le nombre de structures, de déterminer le pourcentage de la surface couverte par les structures, d'effectuer une analyse granulométrique et de déterminer les diamètres minimal, maximal et moyen des structures dans le champ de vision.

2. Petit analyseur d'image avec image fournie par une caméra de télévision ou par un microscope électronique à balayage

Ce modèle a été construit par les fabricants qui désiraient offrir un analyseur d'image bon marché dans lequel l'image est fournie par un microscope électronique à balayage. L'analyseur a les mêmes capacités d'analyse que l'analyseur équipé d'une table à numériser, mais il utilise une caméra de télévision pour saisir l'image fournie par un microscope optique, un épidiascope ou une interface de microscope électronique à balayage. Le petit analyseur d'image est utile pour des analyses simples telles que la détermination des pourcentages de surface ou la granulométrie.

3. Analyseur d'image câblé ordinaire

Les analyseurs d'image câblés ordinaires sont les analyseurs modulaires polyvalents qui ont été mis au point en 1969. La saisie de l'image se fait à l'aide d'une caméra de télévision. L'image est balayée tous les dixièmes de seconde et est analysée immédiatement. Une seule mesure est effectuée à chaque balayage. Si on a besoin d'une série de mesures, on effectue un balayage du champ à partir d'une nouvelle image (image réelle) du champ. L'utilisation d'une image réelle requiert un détecteur bidimensionnel de grande précision pour éliminer les halos autour des phases gris pâle; même ainsi, il est difficile d'obtenir une détection précise car le bruit de fond électroni-

que dans l'image varie d'un balayage à un autre. De plus, avec l'image de télévision, on a besoin d'un correcteur d'ombre afin de réduire l'effet d'un éclairage non uniforme. En pratique, l'analyseur d'image câblé doit être équipé d'un éditeur d'image interactif pour éliminer le bruit de fond électronique, réduire la surdétection de certaines structures dans certaines parties du champ et améliorer la sous-détection dans d'autres parties. Par conséquent, il est rarement possible d'obtenir une analyse d'image complètement automatique avec cet instrument. Les analyses peuvent se faire dans le mode champ et dans le mode champ-structure. Cela comprend toutes les mesures qui peuvent être effectuées par les deux types d'analyseurs susmentionnés, auxquelles s'ajoute la mesure du pourcentage de structures libres. L'analyseur d'image câblé ne peut classifier les structures non libérées.

4. Analyseur d'image informatisé ordinaire

L'analyseur d'image informatisé a remplacé l'analyseur câblé. C'est l'instrument de base utilisé de nos jours. L'analyseur saisit une image de télévision et la conserve en mémoire. L'image mise en mémoire peut être nettoyée électroniquement et toutes les mesures se font sur l'image propre. Le système comporte au moins quatre mémoires d'image pour la manipulation de l'image, mais des modèles plus importants possèdent jusqu'à 16 mémoires. L'amélioration de l'image est bien supérieure à celle obtenue avec un analyseur câblé, mais le correcteur d'ombre précis est encore indispensable et il est souvent nécessaire d'utiliser un éditeur d'image interactif. Les analyses peuvent s'effectuer dans les quatre modes: champ, champ-structure, structure et réflexion ou transmission. La plupart des analyseurs d'image informatisés complets offerts dans le commerce peuvent compter le nombre de structures, mesurer le pourcentage de surface occupé, déterminer le pourcentage de structures libres, caractériser les structures non libérées, déterminer les formes et les rapports de forme, effectuer une analyse de taille en fonction de la longueur de segments, de la surface, du diamètre maximal, du diamètre minimal et du diamètre moyen des structures et mesurer d'autres paramètres qui permettent de classer ces structures en fonction de leurs caractéristiques physiques.

5. Analyseur d'image SEM-TV à une voie

La mise au point d'interfaces convenables entre l'analyseur d'image informatisé ordinaire et le microscope électronique à balayage a permis de raccorder l'analyseur avec à la fois un microscope à balayage et une caméra de télévision. Un tel dispositif permet de recueillir une image SEM formée par les électrons secondaires (SE) ou par les électrons rétrodiffusés (BSE) ainsi qu'une image de télévision obtenue avec un microscope optique. L'image BSE est préférable car le niveau de gris est proportionnel au nombre atomique moyen des éléments. Par conséquent, chaque structure peut être différenciée en fonction de sa composition chimique à partir du niveau de gris. Le principal avantage de l'image SEM-BSE sur l'image TV est que l'image SEM-BSE est meilleure, probablement parce que le rapport signal/bruit est supérieur avec le générateur du microscope à balayage. L'amélioration la plus évidente est que le niveau de gris d'une phase reste constant lorsque l'échantillon est déplacé d'un champ à un autre, alors qu'il varie quelque peu avec un microscope optique. Le microscope à balayage présente un autre avantage avec les phases qui sont optiquement similaires, mais qui ont des compositions différentes. Ces phases ne peuvent pas être différenciées dans une image optique obtenue avec une caméra de télévision, alors qu'elles peuvent l'être immédiatement avec une image SEM-BSE. Les capacités d'analyse de l'analyseur raccordé à un microscope électronique sont les mêmes que celles de l'analyseur d'image informatisé équipé d'une caméra de télévision.

6. Analyseur d'image SEM

La technique consistant à diriger un faisceau d'électrons sur un microscope à balayage équipé d'un analyseur en dispersion d'énergie (EDXA) a été utilisée pour la première fois en 1974 pour caractériser des structures en fonction de leur composition et pour effectuer une analyse des structures. L'analyse était effectuée par un analyseur d'image distinct raccordé à l'EDXA. L'analyseur d'image dirigeait le faisceau pour balayer les éléments et l'EDXA analysait le spectre de rayons X et le comparait à ceux d'un fichier pour identifier les structures. Le système utilise une image réelle fournie par un microscope à balayage. Les capacités d'analyse de l'analy-

seur d'image distinct sont inférieures à celles de l'analyseur d'image informatisé ordinaire. L'instrument peut déterminer le pourcentage superficiel, effectuer une analyse granulométrique, compter les structures et les classer en fonction du diamètre, du rapport de forme et de quelques autres paramètres. Il ne peut pas déterminer si les particules sont libres ou non.

7. Analyseur d'image SEM-EDXA

Plusieurs fabricants d'EDXA ont modifié les programmes utilisés avec l'analyseur d'image SEM pour en faire des programmes EDXA et l'un d'entre eux offre les programmes EDXA pour les appareils EDXA vendus par les autres fabricants. Les modes de fonctionnement et les capacités de l'analyseur d'image SEM-EDXA sont essentiellement les mêmes que celles de l'analyseur SEM, mais les programmes EDXA offerts par certains fabricants sont suffisamment différents pour qu'il soit nécessaire de faire des comparaisons avant d'acheter un analyseur d'image.

8. Analyseur d'image SEM-EDXA à deux voies

Les fabricants d'analyseurs d'image informatisés ordinaires ont construit une interface qui permet un dialogue entre l'analyseur d'image, le microscope à balayage et l'EDXA. Cette interface a mené à la mise au point d'un analyseur d'image très puissant. La séquence d'opérations typique d'un tel système est la suivante: (1) saisie d'une image fournie par le microscope à balayage à l'aide de l'analyseur; (2) nettoyage du bruit électronique et des structures indésirables de l'image avec l'analyseur d'image; (3) braquage du faisceau électronique du microscope à balayage par l'analyseur d'images pour balayer chaque structure dans "l'image propre"; (4) collecte du spectre de rayons X de chaque structure par l'EDXA et classement en fonction de la composition; (5) comparaison du spectre analysé avec un fichier minéralogique ou chimique pour identifier chaque structure; et (6) analyse des structures identifiées avec l'analyseur d'image. Ce système d'analyse d'image possède les capacités, la polyvalence et les avantages de tous les systèmes décrits ci-dessus. Le principal inconvénient est son coût élevé. Il comporte en effet trois interfaces: l'analyseur d'image informatisé ordinaire, le microscope électronique à balayage et l'analyseur en dispersion d'énergie.

9. Analyseur d'image à microsonde

Une microsonde Cameca équipée de quatre spectromètres de longueur d'onde est utilisée dans un analyseur d'image à la Royal School of Mines (Jones, 1985). L'analyse consiste en un balayage linéaire de l'échantillon selon un schéma prédéterminé et en des mesures avec chaque spectromètre tous les 2 micromètres pendant 1/10 de seconde. Un infoprogramme donne les résultats suivants: (1) identification des phases en fonction de 4 éléments chimiques; (2) pourcentage volumique à partir de l'analyse de segments; (3) analyse de la longueur de segments; (4) pourcentage de grains libres; et (5) caractéristiques des éléments non libérés.

10. Infoprogrammes

Un grand nombre de chercheurs écrivent des infoprogrammes pour résoudre une grande variété de problèmes d'analyse d'image. Ces programmes sont destinés à: (1) des projets universitaires pour des étudiants diplômés; (2) la résolution de problèmes spécifiques tels que le triage de fibres croisées dans le but d'effectuer des analyses de fibres (Scott et Chatfield, 1979; Dixon et Taylor, 1979); (3) la résolution de problèmes d'analyse de cartes (Fabbri, 1984); (4) la conduite de projets importants tels que la préparation d'un ensemble complet de programmes pour effectuer des analyses d'images avec un EDXA; et (5) d'autres projets (Miller et coll., 1982).

RÉFÉRENCES

1. Gordon, R. "Reconstruction from projections: a survey of applications"; *in Fourth International Congress for Stereology*; Éditeurs, Underwood, E.E., DeWit, R. et Moore, C.A., NBS Special Pub. 431, p. 201-202, 1976.

2. Hougardy, H.P. "Automatic image analysing instruments today"; *in Fourth International Congress for Stereology*, Éditeurs, Underwood, E.E., Dewit, R. et Moore, C.A., NBS Special Pub. 431, p. 141-148, 1976.

3. Jones, A.V. et Smith, K.C.A. "Image processing for scanning microscopists"; *Scanning Electron Microscopy*, Vol. 1, p. 13-26, 1978.

4. Lee, R.J., Spitzig, W.A., Kelly, J.F. et Fisher, R.M. "Quantitative metallography by computer controlled scanning electron microscopy"; *Jour of Metals*, Vol. 33, N° 3, *p. 20-25, 1981.*

5. Jones, M.P. "Recent developments in rapid collection of quantitative data"; *in Process Mineralogy*, Éditeurs, Park, W.C., Hausen, D.M. et Hagni, R.D.; AIME/TMS, p. 141-155, 1985.

6. Stott, W.R., et Chatfield, E.J. "A precision SEM image analysis system with full feature EDXA characterization"; *Scanning Electron Microscopy*, Vol. 2, p. 53-60, 1979.

7. Dixon, R.N. et Taylor C.J. "Asbestos fibre counting by automatic image analysis"; *Scanning Electron Microscopy*, Vol. 2, p. 361-366, 1979.

8. Fabbri, A.G. *Image processing of geological data*; Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1984.

9. Miller, P.R., Reid, A.F. et Zuiderwyk, M.M. "QEM-SEM image analysis in the determination of modal assays, mineral associations and mineral liberations"; *Proceedings, 14th International Mineral Processing Congress*; publié par CIM, document 8-3, p. 20, 1982.